

直流融冰装置的研制与应用

傅 闯¹, 饶 宏¹, 黎小林¹, 晁 剑³, 田 杰², 陈松林², 赵立进³, 许树楷¹, 马晓红³

(1. 南方电网技术研究中心, 广东省广州市 510623; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211100;

3. 贵州电网公司, 贵州省贵阳市 650217)

摘要: 输电线路的持续覆冰会导致输电线路严重受损, 造成电网部分或全网停运。为了防止这种情况的再次出现, 进行输电线路的融冰是一种很好的方法, 直流融冰技术的研究与应用对于电网抗击冰灾具有重大意义。通过对南方电网各电压等级架空线路直流融冰参数进行仔细分析和计算, 提出了适用于南方电网的交流输电线路的直流融冰技术方案, 介绍了南方电网直流融冰装置样机的研制及其应用, 特别介绍了 60 MW, 25 MW 和 500 kW 直流融冰装置的样机设计、工厂测试、现场试验和现场实际融冰效果。

关键词: 直流融冰; 融冰装置; 融冰电流

中图分类号: TM721

0 引言

中国是世界上受气象灾害影响最严重的国家之一, 灾害种类多、强度大、频率高。历史上, 大面积冰灾、台风、龙卷风等恶劣气象条件引发的电网事故时有发生。近年来, 受全球气候变暖影响, 各类气象灾害更为频繁, 极端天气气候事件更显异常, 破坏程度越来越强, 造成的损失和影响也更趋严重^[1-3]。

2008 年初发生的低温雨雪冰冻灾害, 共造成全国范围电网停运电力线路 36 740 条, 停运变电站 2 018 座, 110 kV~500 kV 线路 8 381 基杆塔倾倒及损坏, 全国共 170 个县(市)发生供电中断。南方电网供电区域的贵州大部分地区、广西桂北地区、广东粤北地区和云南滇东北地区电网设施遭受到严重破坏, 仅南方电网的直接经济损失就高达 150 多亿元。这次冰灾表明中国电网抵御和防范极端天气灾害的能力仍有待提高^[4-8]。

南方电网公司提出了适当提高建设标准、优化电网结构和加强电网建设、优化电源结构和电源布局、应用抗冰融冰技术、完善应急机制的综合措施, 组织开展了电网应对极端气候影响关键技术的研究工作, 实施了电网加固、融冰技术开发与应用、应急通信系统改造建设三大综合应对措施, 形成一套完整的防灾减灾保障体系^[3,5-6]。

融冰技术主要包括交流融冰和直流融冰技术。南方电网有针对性地开展全面研究, 对交直流融

冰技术及应用提出了专题报告, 并结合融冰规程的制定对相关问题做出了明确规定和说明。从资料分析可知^[1-13], 国内外现有直流融冰技术仍需要进一步研究。南方电网直流融冰技术的开发和应用主要是进行直流融冰装置样机研发及示范工程建设与试验。所完成的直流融冰关键技术研究 and 试验、样机开发和研制、示范项目建设和测试等各项工作, 均取得了突破性成果, 通过了专家评审验收。2009 年初连日持续低温期间, 贵州、广东、云南三省电网陆续启动融冰装置对超出警戒线的多条 500 kV, 220 kV 和 110 kV 线路进行了成功的融冰。

1 直流融冰技术方案研究

与交流短路融冰不同, 直流融冰法将交流电源通过大容量电力电子设备转化为直流进而加热一定长度的覆冰线路达到融冰的目的, 由于直流融冰电流本身在线路上流动时不消耗无功, 仅直流换流器自身需要消耗一部分无功, 因此直流法适用于多个电压等级的融冰。直流融冰的电源可以取自发电机, 也可以取自交流电网, 将两相或三相导线一端接入直流融冰装置, 另一端短路, 通过大功率整流器将直流电流注入导线加热来达到融冰的目的。直流电流产生的热量必须大于导线散热量和融冰热量之和, 覆冰才能融化。

应用直流融冰时需要考虑以下几个关键技术问题: ①融冰线路需要的最小融冰电流; ②直流融冰装置的容量及其能够提供的最大融冰电流和输出直流电压; ③直流融冰装置输入电源的获取; ④换流器运行时产生的无功和谐波对交流电网的影响和需求;

收稿日期: 2008-12-24; 修回日期: 2009-03-17。

中国南方电网有限责任公司 2008 年重大科技项目资助 (CSGK0801)。

⑤直流融冰装置在变电站的接入系统设计(主要包括交流侧电源接入和直流侧与融冰线路的连接)。

由发电机(发电车)提供电源的直流融冰示意图如图 1 所示。发电机主要指大功率柴油发电机组,当然也可以是电网中存在的发电机,主接线改造后,通过旁路接到整流器,实施融冰。

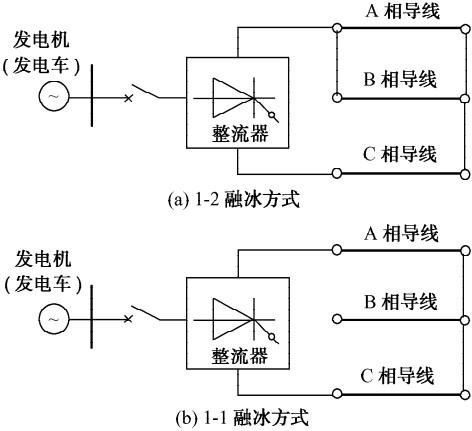


图 1 由发电机(发电车)提供电源的直流融冰方案
Fig.1 De-icing method for three-phase AC lines supplied by generator (generator car)

由变电站提供电源的直流融冰方案如图 2 所示,由系统提供电源,经整流变压器、整流装置,带线路融冰。其中,在一定条件下,例如如果 220 kV 和 110 kV 变电站中 10 kV 正好适合该类整流器需要的输入电源,且考虑到在特殊情况下,可以将一台 220 kV 主变或 110 kV 主变 10 kV 侧腾空以作为整流器的输入电源,220 kV 主变或 110 kV 主变也可以提供整流器需要的换相电抗,则可以将整流器直接接在 220 kV 主变或 110 kV 主变 10 kV 侧。

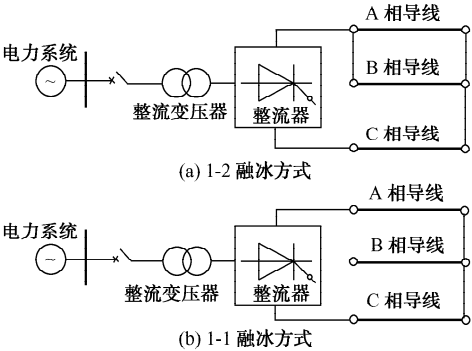


图 2 由变电站提供电源的直流融冰方案
Fig.2 De-icing method for three-phase AC lines supplied by substation

这种方式由于没有整流变压器,整流器可较为方便地在各变电站直接移动,但这种直流方式只能采用 6 脉动整流,产生的无功和谐波的影响也不可忽视,且直接利用 220 kV 主变或 110 kV 主变电抗

作为换相电抗,对主变的影响也需要评估。
1998 年北美冰灾后魁北克水电局与 AREVA 公司合作开发了高压直流融冰装置,并在魁北克电网的一个枢纽变电站安装此装置。但该装置目前仅作为静止无功补偿(SVC)装置运行,没有进行过实际的融冰^[10-12]。

基于以上思路,南方电网技术研究中心对国内外融冰技术进行收集、归纳、分析和比较,对南方电网各电压等级架空线路直流融冰参数进行了分析和计算,提出了适用于南方电网交流输电线路的直流融冰技术方案、融冰装置基本功能和关键技术参数,并利用 PSCAD/EMDCT 进行了大量仿真分析^[3,5-6]。根据这些研究,确立了南方电网直流装置样机研发的基本技术条件和功能规范,提出了按照输电线路电压等级,采用相应的直流融冰装置:对于 500 kV 输电线路可采用交流 35 kV 供电的大容量固定式直流融冰装置(样机容量为 60 MW);对于 220 kV 和 110 kV 输电线路可采用交流 10 kV 供电的站间移动式直流融冰装置(样机容量为 25 MW);对 35 kV 及以下电压等级输电线路适用交流 400 V 供电的小容量移动式直流融冰装置(样机容量为 500 kW)。对接入变电站的直流融冰装置的基本要求如下:

- 1)为满足不同线路长度、导线参数的融冰需要,直流融冰装置输出的调节范围要宽,其换流器能够大角度、大电流长期运行,尽量减少谐波、噪声等对系统和变电站的影响,不需要额外的电压调节(即使配备电源变压器,对分接头也没有额外要求)。
- 2)直流融冰装置应占地少、操作简便、维护量少、便于移动,故采用了基于集装箱式的结构。
- 3)对直流融冰装置控制保护功能进行了研究,开发了直流融冰装置的控制保护系统,并利用实时数字仿真系统(RTDS)对直流融冰装置控制保护系统进行了完整的测试。
- 4)直流融冰装置研制中还考虑了兼顾 SVC 功能的可能性,并预留有相应接口,以提高设备利用率、增加变电站的动态电压支撑能力。

2 直流融冰装置样机研制

2.1 60 MW 直流融冰装置样机

60 MW 直流融冰装置样机原理见图 3,实物图见附录 A 图 A1。该样机的额定输出电压 16.7 kV,额定输出电流 3.6 kA,额定输出功率 60 MW,直流电压调节范围 0~20 kV,直流电流调节范围 400 A~4 320 A,具有 1.2 倍过载能力。使用 5 英寸(1 英寸=0.025 4 m)晶闸管,水-风强迫冷却方式。通过整流变压器由 35 kV 电源供电。具有三相自

动切换功能,采用集装箱方式安装。该直流融冰装置预留了扩展为 SVC 装置的相应接口,可以方便地转换为 SVC 工况运行。

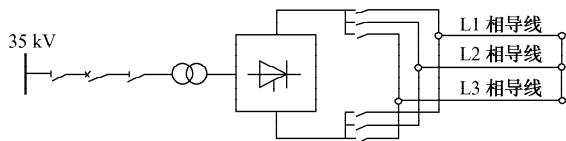


图 3 60 MW 直流融冰装置样机原理

Fig. 3 Schematic diagram of 60 MW DC deicer prototype

2.2 25 MW 直流融冰装置样机

25 MW 直流融冰装置样机原理见图 4,实物图见附录 A 图 A2。该样机的额定输出电压 12.5 kV,额定输出电流 2 kA,额定输出功率 25 MW,直流电压调节范围 0~12.5 kV,直流电流调节范围 300 A~2 400 A,具有 1.2 倍过载能力。该样机使用 4 英寸晶闸管,水-风强迫冷却方式。由 10 kV 电源供电,具有三相自动切换功能,采用集装箱式安装。同时预留了扩展为 SVC 装置的相应接口,可以方便地转换为 SVC 工况运行。

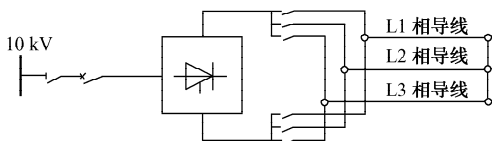


图 4 25 MW 直流融冰装置样机原理

Fig. 4 Schematic diagram of 25 MW DC deicer prototype

2.3 500 kW 直流融冰装置样机

500 kW 直流融冰装置样机原理见图 5,实物图见附录 A 图 A3。该样机的额定输出电压 500 V,额定输出电流 1 kA,额定输出功率 500 kW,直流电压调节范围 0~500 V,直流电流调节范围 200 A~1 200 A,具有 1.2 倍过载能力。由变电站 400 V 侧或发电车直接供电,具有三相自动切换功能,采用 2.5 英寸晶闸管,强迫风冷,箱式安装,安装在车辆上。

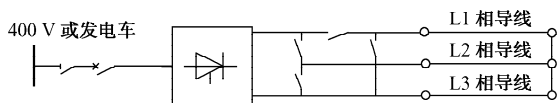


图 5 500 kW 直流融冰装置样机原理

Fig. 5 Schematic diagram of 500 kW DC deicer prototype

上述 3 个直流融冰装置样机分别采用通过整流变压器、直接接入变电站主变压器和直接接入发电车(发电机)3 种与电源的接入方式。这 3 种接入方式对接入系统的影响分析和现场测试数据能够为直流融冰装置接入电源方式的选择、运行和维护提供

有价值的参考。

3 直流融冰装置的应用

贵州福泉变电站是 2008 年冰灾的重灾区。福泉 500 kV 变电站具有 500 kV,220 kV,110 kV,35 kV 以及 10 kV 共 5 个电压等级,出线回路数多,具备直流融冰技术应用和示范的条件,因此将直流融冰装置样机和现场试验地点选择在福泉 500 kV 变电站。由于采取了合理的设计原则、有效利用了原有设备和场地条件,使得固定式和站间移动式 2 套直流融冰装置在不新征地、不影响变电站的运行和检修、现场改造工作量少、投资省的条件安装在福泉变电站内,为直流融冰装置在已建变电站的应用起到了示范作用。

参考国内高压直流输电工程、串联电容补偿装置、SVC 装置系统调试经验,研究和确定了直流融冰装置系统调试现场试验项目和测试项目,并完成了直流融冰装置系统调试现场试验中无功和谐波的计算和实测的对比分析。

对典型 220 kV 和 500 kV 输电线路最大允许电流与环境温度的关系进行了计算,确保融冰试验不损伤试验导线。对试验线路直流电阻进行了测量,并与理论计算值进行了对比分析。对与试验线路平行和交叉跨越情况进行了调查,并测量直流融冰母线和试验线路交流感应电压,确保试验安全。

2008 年 8 月 14 日,500 kW 移动式直流融冰装置样机在贵州铜仁成功完成了所有预定系统试验项目和测试项目。试验线路为铜仁 110 kV 川太锦线,线路长度为 2.5 km。以 500 kVA 发电车作为电源,试验电流最大为 500 A,试验过程中线路、金具、接头和融冰装置各设备运行正常。线路达 500 A 约 30 min 后,110 kV 川太锦线温升约为 11℃。

2008 年 9 月 5 日,25 MW 站间移动式直流融冰装置样机在贵州 500 kV 福泉变电站成功完成了所有预定现场系统试验项目和测试项目。试验线路为 220 kV 福都线,最大融冰试验电流达到 2 kA,试验过程中线路、金具、接头和融冰装置各设备运行正常。电流升至 2 kA 约 10 min 后,220 kV 福都线温升达到 25℃。

2008 年 10 月 12 日,60 MW 固定式直流融冰装置样机在贵州 500 kV 福泉变电站成功完成了所有预定现场系统试验项目和测试项目。试验线路为 500 kV 福施Ⅱ线,最大融冰试验电流达到 4 kA,试验过程中线路、金具、接头和融冰装置各设备运行正常。电流升至 4 kA 约 15 min 后,500 kV 福施Ⅱ线温升达到 35℃。

现场试验还测量了变压器噪声、中性点偏磁电流、无功功率消耗、谐波等数据,与计算值吻合。分析计算和现场测试表明,直流融冰装置运行产生的谐波不会对数字式继电保护造成影响。

直流融冰装置现场试验成功后,南方电网在贵州、云南、广西和广东 2008 年冰灾区域进行了推广应用。2009 年初连日持续低温期间,贵州、广东、云南三省电网陆续启动融冰装置对超出警戒线的多条 500 kV, 220 kV, 110 kV 线路进行融冰实战,在很短的时间内,导线上的覆冰全部脱落。

直流融冰装置现场试验和实际融冰的成功标志着南方电网公司在直流融冰装置关键参数计算、接入系统设计以及装置研制、调试、运行和应用等方面取得了成功。

4 结语

通过南方电网直流融冰技术的研究和应用,首次将功能完整、实用性强、效果显著、投资少的直流融冰技术及装置应用于实际系统,提供了输电线路应对极端气候的一种应急手段。

直流融冰装置采用大功率可控硅晶闸管及水冷技术,调节范围宽,可长期大角度大电流运行。装置采用自动切换技术,自动切换三相线路连接到整流装置,保证三相线路均衡融冰,安全性高,控制灵活,保护完备,集装箱式结构紧凑,融冰操作简便,可靠性高。直流融冰装置接入设计充分利用原有条件,简便易行。直流融冰系列装置的试验和调试数据印证了直流融冰技术的可行性、解决方案的完整性、技术决策的正确性,科研成果得到转化,发挥了示范作用,开拓了电力电子技术在电力系统应用的新领域。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 薛禹胜,费圣英,卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思: (二)任务与展望. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 1-15.
XUE Yusheng, FEI Shenyong, BU Fanqiang. Upgrade the blackout defense scheme against extreme disasters: Part II tasks and prospects. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-15.
- [2] 唐斯庆,张弥,李建设,等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7.
TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th: causes and recommendations. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7.
- [3] 许树楷,赵杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述. 南方电网技术, 2008, 2(2): 1-6.
XU Shukai, ZHAO Jie. Review of ice storm cases impacted seriously on power systems and de-icing technology. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 1-6.
- [4] 黄强,王家红,欧名勇. 2005 年湖南电网冰灾事故分析及其应对措施. 电网技术, 2005, 29(24): 16-19.
HUANG Qiang, WANG Jiahong, OU Mingyong. Analysis on accidents caused by icing damage in Hunan Power Grid in 2005 and its countermeasures. Power System Technology, 2005, 29(24): 16-19.
- [5] 饶宏,李立涅,黎小林,等. 南方电网融直流融冰技术研究. 南方电网技术, 2008, 2(2): 7-12.
RAO Hong, LI Licheng, LI Xiaolin, et al. Study of DC based de-icing technology in China Southern Power Grid. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 7-12.
- [6] 许树楷,杨煜,傅闻. 南方电网直流融冰方案仿真研究. 南方电网技术, 2008, 2(2): 31-36.
XU Shukai, YANG Yu, FU Chuang. Simulation study of DC de-icing scheme for China Southern Power Grid. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 31-36.
- [7] 刘有飞,蔡斌,吴素农. 电网冰灾事故应急处理及反思. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 10-13.
LIU Youfei, CAI Bin, WU Sunong. Emergency management for the ice disaster in power grids and some suggestions. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 10-13.
- [8] 陆佳政,蒋正龙,雷红才. 湖南电网 2008 年冰灾事故分析. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 16-19.
LU Jiazheng, JIANG Zhenglong, LEI Hongcai. Analysis of Hunan power grid ice disaster accident in 2008. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 16-19.
- [9] LAFORTE J L, ALLAIRE M A, LAFLAMME J. State-of-the-art on power line de-icing. Atmospheric Research, 1998, 46(1): 143-158.
- [10] DERY A, GINGRAS J, HYDRO P. Québec de-icing projects// Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, June 12-16, 2005, Montreal, Canada.
- [11] HORWILL C, DAVIDSON C C, GRANGER M, et al. An application of HVDC to the de-icing of transmission lines// Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May 16-18, 2006, Dallas, USA.
- [12] GRANGER M, DUTIL A, NANTEL A. Performance aspects of Levis substation de-icing project using DC technology// Proceedings of the IEEE PES 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, June 12-16, 2005, Montreal, Canada.
- [13] HUNEAULT M, LANGHEIT C. Combined models for glaze ice accretion and de-icing of current-carrying electrical conductors. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1611-1616.

傅 闻(1973—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:高压直流输电、电能质量控制、静止无功补偿装置。E-mail: fuchuang@csg.cn

饶 宏(1961—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:交直流电力系统及高压直流输电的研究、设计、建设和管理。

黎小林(1964—),男,高级工程师,主要研究方向:交直流电力系统及高压直流输电的研究、设计、建设和管理。

(下转第 107 页 continued on page 107)

Development and Application of DC Deicer

*FU Chuang*¹, *RAO Hong*¹, *LI Xiaolin*¹, *CHAO Jian*³, *TIAN Jie*², *CHEN Songlin*²,
*ZHAO Lijin*³, *XU Shukai*¹, *MA Xiaohong*³

- (1. China Southern Power Grid Technology Research Center, Guangzhou 510623, China;
2. Nanjing NARI-Relay Electric Co. Ltd., Nanjing 211100, China;
3. Guizhou Power Grid Company, Guiyang 650217, China)

Abstract: Ice-clad transmission lines can seriously damage a power grid to cause its partial or whole breakdown. Deicing the transmission line is a good method to prevent recurrence of such a situation. The development of DC-based deicing technology can make a difference for networks to fight the ice disaster. Based on the calculation and analysis of the transmission line deicing parameters, a DC-based deicing technical scheme for typical AC transmission lines in China Southern Power Grid is proposed. The development and application of DC deicer prototypes in China Southern Power Grid (CSG) is discussed, with those of 60 MW, 25 MW and 500 kW DC deicers addressed in particular, including their design, factory test, field test and the actual application effect.

This work is supported by Special Fund of Key Science and Technology Projects of China Southern Power Grid (No. CSGK0801).

Key words: DC deicer; deicing device; deicing current

附录 A



图 A1 60 MW 直流融冰装置样机实物图
Fig.A1 Photo of 60 MW DC deicer prototype



图 A2 25 MW 直流融冰装置样机实物图
Fig.A2 Photo of 25 MW DC deicer prototype



图 A3 500 kW 直流融冰装置样机实物图
Fig.A3 Photo of 500 kW DC deicer prototype